

УДК 681.5.015.24

Параметрическая оптимизация электромеханических систем с регуляторами и наблюдателями состояния¹

А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин, В.В. Аполонский
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: anis@eims.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время в системах автоматического управления электромеханическими объектами широко используются регуляторы с наблюдателями состояния, синтез которых проводится как методами модального, так и методами оптимального управления. Применение методов оптимизации позволяет учесть весь комплекс требований, предъявляемых к качеству управления, однако при этом возникают проблемы формирования критериев оптимальности, а также сходимости процедур поиска экстремума. В связи с этим представляется перспективной разработка методов синтеза регуляторов с наблюдателями состояния, сочетающих принципы модального и оптимального управления, основанных на применении критериев, включающих прямые показатели качества систем автоматического управления.

Материалы и методы: Используются методы пространства состояний, модального управления, численные алгоритмы оптимизации, имитационное моделирование динамических систем в среде MatLab 7.1.

Результаты: Разработана методика параметрической оптимизации систем с регуляторами с наблюдателями состояния, основанная на вариации корней характеристического полинома систем автоматического управления, а также на применении комплексного критерия оптимальности, включающего в себя основные показатели качества управления. На примере электромеханической системы с регуляторами с наблюдателями состояния показано, что полученная в результате оптимизации система автоматического управления обладает низкой чувствительностью к воздействию помех, параметрической грубостью и заданными динамическими характеристиками.

Выводы: Предлагаемая методика параметрической оптимизации систем с регуляторами с наблюдателями состояния, сочетающая принципы модального и оптимального управления, является эффективным и достаточно универсальным средством достижения компромисса между основными показателями качества в процессе проектирования систем автоматического управления.

Ключевые слова: система автоматического управления, регулятор состояния, наблюдатель состояния, модальное управление, оптимальное управление, характеристический полином, критерий оптимальности, робастность, помехоустойчивость, генетический алгоритм, электромеханическая система.

Parametrical optimization of regulators and state observers in electromechanical systems

A.A. Anisimov, S.V. Tararykin, V.V. Apolonsky
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: anis@eims.ispu.ru

Abstract

Background: The article deals with automatic control systems (ACS) based on the regulators with state observers for electromechanical objects, which are synthesized with the modal control or optimization procedures. The application of optimization methods makes it possible to satisfy a whole complex of requirements for system quality. However, this raises a problem of optimization criteria formation, as well as a problem of convergence of the extremum search procedures. Therefore, it seems reasonable to develop complex methods of designing regulators with state observers combining the principles of modal control and optimal control, based on direct indicators of ACS quality.

Materials and methods: The study employed methods of state space, modal control, numerical optimization algorithms, and simulation of dynamic systems in MatLab 7.1.

Results: A method of parametric optimization of systems with regulators and state observers has been developed based on the variation of characteristic polynomial roots of the control system as well as the application of complex optimization criteria which include the main control quality indicators. By using an electromechanical system with regulators with state observers as an example, it is shown that the optimized system has a low noise sensitivity, parametric robustness and specific dynamic characteristics.

Conclusions: The proposed method of parametric optimization of systems with state observers, combining the principles of modal and optimal control, is an effective and universal tool for achieving a compromise between the main indicators of control quality in the process the ACS design.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части Государственного задания на 2016 г.

Key words: automatic control system, state regulator, state observer, modal control, optimal control, characteristic polynomial, optimization criterion, robustness, noise sensitivity, genetic algorithm, electromechanical system.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.2.021-026

Перспективным путем повышения качества управления сложными электромеханическими объектами считается применение управляющих устройств высокого порядка, к которым относятся регуляторы с наблюдателями состояния (РНС). Широкие потенциальные возможности систем с РНС объясняются высокой гибкостью структуры, а также применением всего одного датчика выходной координаты объекта управления. Вместе с тем подобные системы автоматического управления (САУ) должны удовлетворять комплексу показателей качества, робастности и помехоустойчивости, что затрудняет решение задачи синтеза РНС аналитическими методами [1, 4–7].

Процедура синтеза САУ сложными объектами с РНС включает в себя этапы формирования структуры и расчета параметров управляющего устройства. Выбор оптимальной структуры наблюдателя проводится на основе требований параметрической грубости системы, а также удобства технической реализации регулятора [1]. Параметрический синтез РНС может осуществляться как по заданным показателям качества, в том числе методом модального управления [4, 6, 7], так и на основе принципов оптимального управления [5, 6, 9].

Параметры системы управления с РНС, полученные методом модального синтеза на основе стандартных распределений корней характеристического полинома [4, 6, 7], обычно не являются оптимальными. При таком подходе трудно учесть влияние параметрических и сигнальных возмущений, а также нелинейных факторов, присущих реальным электромеханическим объектам.

Применение методов оптимизации позволяет получить результат, отвечающий всему комплексу требований к САУ электромеханическим объектом. В то же время решение задачи оптимизации осложняется проблемой формирования критериев качества управления, большинство из которых носят косвенный характер [8–10], а также проблемой сходимости процедур поиска глобального экстремума целевой функции.

В связи с этим при синтезе систем с РНС целесообразен переход от косвенных критериев оптимальности к прямым [2, 10], включающим в себя комплекс показателей качества управления: быстрдействие, точность, параметрическая грубость и др. Такой подход, основанный на применении современных алгоритмов параметрической оптимизации [2, 8], дает возможность обеспечить компромисс между указанными требованиями и синтезировать САУ с заданными свойствами.

Задача оптимизации электромеханических систем с РНС имеет свои особенности, что обусловлено сложностью структуры и повышенным числом настраиваемых параметров подобных управляющих устройств. Это требует определенной доработки предложенной ранее [2, 5] методики формирования критериев качества и параметрической оптимизации с учетом специфики систем управления с РНС.

В соответствии с предлагаемой методикой синтеза, формирование структуры наблюдателя осуществляется по критерию параметрической грубости [1], затем проводится двухэтапная процедура параметрической оптимизации системы [2]. На *первом* этапе определяются базовые значения и диапазон вариаций параметров РНС, для чего применяется метод модального управления. На *втором* выполняется оптимизация САУ по комплексному критерию качества с использованием современных поисковых алгоритмов [2, 8]. Подобная процедура позволяет учитывать при синтезе вариации параметров САУ, внешние возмущения, ограничения координат и ряд других нелинейностей (силового преобразователя, магнитной системы двигателя, механизма редуктора и т.п.), не являющихся определяющими в рабочем режиме объекта.

Обобщенная структура системы управления с РНС приводится на рис. 1.

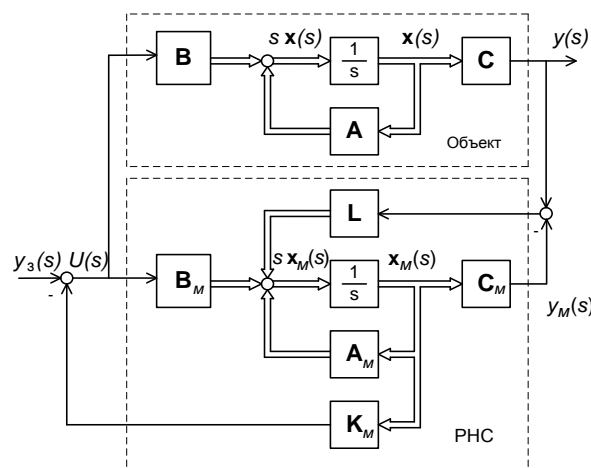


Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы управления с РНС: s – комплексная переменная Лапласа; y_3 , y , y_M – входной и выходные сигналы объекта и наблюдателя состояния (НС); U – управляющее воздействие; x и x_M – векторы координат состояния объекта и НС; A и A_M , B и B_M , C и C_M – матрицы состояния, входа, выхода объекта и НС с размерностями $n \times n$, $n \times 1$, $1 \times n$, где n – порядок объекта; K_M – матрица коэффициентов регулятора; L – матрица подстройки НС

В соответствии с методом модального управления, расчет матрицы регулятора состояния K_M для наблюдателя, представленно-

го в произвольном координатном базисе, выполняется на основе характеристического полинома $D(s) = s^n + d_{n-1}s^{n-1} + \dots + d_1s + d_0$:

$$\mathbf{K}_M = \bar{\mathbf{K}}_M \cdot \bar{\mathbf{U}}_M \mathbf{U}_M^{-1},$$

$$\bar{\mathbf{K}}_M = [d_0 - a_0, d_1 - a_1, \dots, d_{n-1} - a_{n-1}], \quad (1)$$

где $\bar{\mathbf{U}}_M = [\bar{\mathbf{B}}_M \quad \bar{\mathbf{A}}_M \bar{\mathbf{B}}_M \quad \bar{\mathbf{A}}_M^2 \bar{\mathbf{B}}_M \quad \dots \quad \bar{\mathbf{A}}_M^{n-1} \bar{\mathbf{B}}_M]$,

$\mathbf{U}_M = [\mathbf{B}_M \quad \mathbf{A}_M \mathbf{B}_M \quad \mathbf{A}_M^2 \mathbf{B}_M \quad \dots \quad \mathbf{A}_M^{n-1} \mathbf{B}_M]$ – матрицы управляемости наблюдателя в канонической форме управляемости и в его собственных координатах; $a_{m0}, a_{m1}, \dots, a_{mn-1}$ – коэффициенты полинома знаменателя передаточной функции НС.

Вычисление матрицы подстройки наблюдателя \mathbf{L} выполняется по аналогичным соотношениям на основе характеристического полинома $D^*(s) = s^n + d_{n-1}^*s^{n-1} + \dots + d_1^*s + d_0^*$:

$$\mathbf{L} = \tilde{\mathbf{L}} \cdot \tilde{\mathbf{V}}_M \mathbf{V}_M^{-1},$$

$$\tilde{\mathbf{L}} = [d_0^* - a_0, d_1^* - a_1, \dots, d_{n-1}^* - a_{n-1}], \quad (2)$$

где $\tilde{\mathbf{V}}_M = [\tilde{\mathbf{C}}_M^T, \tilde{\mathbf{A}}_M^T \tilde{\mathbf{C}}_M^T, (\tilde{\mathbf{A}}_M^T)^2 \tilde{\mathbf{C}}_M^T \dots (\tilde{\mathbf{A}}_M^T)^{n-1} \tilde{\mathbf{C}}_M^T]$,
 $\mathbf{V}_M = [\mathbf{C}_M^T, \mathbf{A}_M^T \mathbf{C}_M^T, (\mathbf{A}_M^T)^2 \mathbf{C}_M^T \dots (\mathbf{A}_M^T)^{n-1} \mathbf{C}_M^T]$ – матрицы наблюдаемости РНС в канонической форме наблюдаемости и в его собственных координатах.

Выбор полиномов $D(s)$ и $D^*(s)$ осуществляется из числа стандартных на основе требований к динамическим свойствам САУ и темпу подстройки наблюдателя [4, 6, 7]. Помимо процедуры модального синтеза, выполняется расчет областей параметрической грубости полученной системы [1], которые определяют диапазоны вариации параметров РНС в процессе оптимизации.

Как показывают исследования, непосредственная вариация параметров РНС, т. е. элементов матриц \mathbf{K}_M и \mathbf{L} , в процессе оптимизации нецелесообразна, поскольку приводит к плохой обусловленности задачи. Это объясняется тем, что при выборе темпа подстройки наблюдателя в 2–3 раза выше темпа переходных процессов в САУ вид распределения корней характеристического полинома контура подстройки мало влияет на свойства системы.

Проведенный анализ систем управления с РНС позволяет выделить группу параметров, определяющих основные статические и динамические свойства подобных САУ. Для этого запишем характеристический полином системы управления $D(s)$ и полином подстройки наблюдателя $D^*(s)$ в нормированном виде:

$$D(s) = s^n + \bar{d}_{n-1} \Omega_O s^{n-1} + \dots + \bar{d}_1 \Omega_O^{n-1} s + \Omega_O^n,$$

$$D^*(s) = s^n + \bar{d}_{n-1}^* \Omega_H s^{n-1} + \dots + \bar{d}_1^* \Omega_H^{n-1} s + \Omega_H^n,$$

где Ω_O и Ω_H – среднегеометрические корни (СГК) соответствующих полиномов.

Как показывает анализ приведенных выражений, к указанной группе относятся следующие параметры РНС:

– СГК Ω_H характеристического полинома подстройки наблюдателя $D^*(s)$, влияющий на робастность и помехоустойчивость САУ;

– СГК Ω_O желаемого характеристического полинома $D(s)$, определяющий темп переходных процессов в САУ;

– нормированные коэффициенты полинома $D(s)$, определяющие конкретный вид переходной характеристики САУ: $\bar{d}_1, \bar{d}_2, \dots, \bar{d}_{n-1}$.

В процессе оптимизации системы управления с РНС при таком подходе следует варьировать величины корней Ω_O и Ω_H , а также коэффициенты нормированного полинома $D(s)$. На каждом шаге поискового алгоритма при этом необходимо рассчитывать значения матриц \mathbf{K}_M и \mathbf{L} с использованием уравнений (1) и (2) соответственно.

В задачах оптимизации электромеханических систем ранее было предложено использовать расширенный критерий качества [2], включающий в себя нормированные показатели быстродействия \bar{q}_1 , точности \bar{q}_2 , параметрической грубости \bar{q}_3 и мощности управляющих воздействий \bar{q}_4 :

$$\bar{q}_m = 1 - \left(\prod_{i=1}^m \bar{q}_i \right)^{1/m}, \quad (3)$$

где $m = 4$ – число показателей качества управления в составе критерия.

В качестве показателя быстродействия q_1 здесь принимается время нарастания переходной характеристики t_n , а в качестве показателя точности q_2 – средний модуль относительного отклонения выходной координаты объекта на интервале времени от t_n до t_1 :

$$\bar{\sigma}_y = \frac{1}{N-T} \sum_{j=T}^N \left| \frac{y_j - y_3}{y_3} \right| \cdot 100\%,$$

где $T = t_n / T_O$ и $N = t_1 / T_O$ – относительное время нарастания и переходного процесса; T_O – период квантования.

Показателем робастности q_3 может служить средний модуль отклонения переходной характеристики системы при вариации параметров объекта управления относительно расчетных значений за время переходного процесса:

$$\bar{\sigma}_R = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{y_j - y_j^*}{y_j} \right| \cdot 100\%,$$

где y_j, y_j^* – значения выходной координаты при расчетных и измененных параметрах объекта.

В качестве показателя мощности управляющих воздействий q_4 в задачах оптимизации электромеханических объектов целесообразно принять пиковое значение тока двигателя I_n ,

которое ограничивается перегрузочной способностью силовой части системы.

Объединение различных по физической природе показателей качества в составе критерия осуществляется путем нормирования с использованием функции Харрингтона:

$$\bar{q}_i = \exp(-\exp(-z_i)),$$

где $z_i = b_{0i} + b_{1i}q_i$, $b_{0i} = z_i^{xop} - b_{1i}q_i^{xop}$, $b_{1i} = (z_i^{xop} - z_i^{пл}) / (q_i^{xop} - q_i^{пл})$; z_i , \bar{q}_i – кодированное и нормированное значения критерия; z_i^{xop} , q_i^{xop} и $z_i^{пл}$, $q_i^{пл}$ – значения, соответствующие хорошему и плохому качеству системы.

Оптимизация систем с РНС, обладающих повышенным числом степеней свободы, требует дополнения предложенного критерия оптимальности. Повышение темпа подстройки наблюдателя приводит к улучшению робастных свойств системы в целом, однако чувствительность к внешним возмущениям при этом возрастает. Для достижения компромисса между требованиями к качеству САУ и сходимости поисковых процедур необходимо введение в состав критерия (3) показателя помехоустойчивости q_5 , при этом $m = 5$.

В качестве показателя помехоустойчивости может служить величина среднеквадратического отклонения координаты состояния объекта, наиболее подверженной влиянию помех, в установившемся режиме $q_5 = \bar{\sigma}_{nl}$. Применительно к электромеханическим объектам при вычислении данного показателя целесообразно использовать ток двигателя:

$$\bar{\sigma}_{nl} = \sqrt{\frac{1}{NN - N} \sum_{j=N}^{NN} (I_{яj} - \bar{I}_{я})^2},$$

где N и NN – относительные время переходного процесса и длительность наблюдения; $\bar{I}_{я}$ – среднее значение тока в установившемся режиме.

В тех случаях, когда назначение оценок «хорошо» – «плохо» на шкале Харрингтона оказывается затруднительным, следует уточнить их построением проекций зоны компромиссов Парето, проводя регулярное сканирование всей области варьируемых параметров регулятора.

Параметрическая оптимизация систем управления с РНС на основе комплексных критериев качества вида (3) осуществляется с использованием численных поисковых алгоритмов, реализуемых на ЭВМ. Наиболее эффективным при этом оказывается применение генетических алгоритмов, основанных на моделировании процессов естественного отбора в живой природе [8].

Применение расширенного критерия (3) позволяет обеспечить компромисс между основными техническими показателями качества САУ электромеханическим объектом с РНС – быстродействием, точностью, робастностью, помехоустойчивостью и энергетическими затратами. При этом поверхность отклика функционала качества приобретает четко выраженный экстремум, что снимает проблему обусловленности задачи оптимизации.

Исследование эффективности предлагаемой методики оптимизации РНС проводилось на примере двухмассовой электромеханической системы (ЭМС) со структурой [3], приведенной на рис. 2, где M , M_y – моменты двигателя и упругой передачи; Ω_1 , Ω_2 – угловые скорости первой и второй масс; $C = 0,16$ Вб – конструктивный параметр двигателя постоянного тока; $T_{я} = 0,5$ с, $R_{я} = 0,35$ Ом – постоянная времени и сопротивления якорной цепи; $J_1 = 0,5$, $J_2 = 0,85$ (кг · м²) – моменты инерции первой и второй масс; $C_{12} = 1,5$ Н·м – коэффициент жесткости передачи; $K_D = 0,25$, $K_T = 4,5$ (кг · м²/с) – коэффициенты трения.

Пусть необходимо обеспечить требования к быстродействию $t_n < 1,25$ с, точности управления $\bar{\sigma}_y < 2,5$ %, току якоря $I_{я} < 100$ А, а также к минимальной чувствительности САУ к параметрическим и внешним возмущениям.

На систему воздействует помеха ξ в виде случайного процесса с равномерным спектром в диапазоне 0–100 рад/с и дисперсией $\sigma_{\xi}^2 = 2,5 \cdot 10^{-5}$ рад/с, соответствующая реальным искажениям сигнала измерителя скорости 2-й массы. Воздействующее на систему параметрическое возмущение представляет собой изменение коэффициента жесткости механической передачи от 1-й ко 2-й массе системы C_{12} в 2,5 раза.

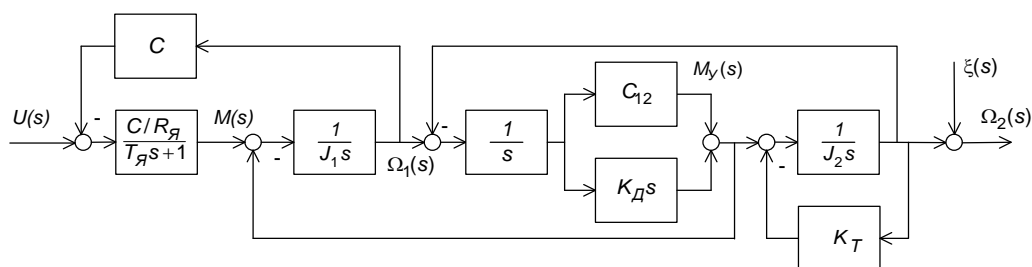


Рис. 2. Структурная схема линейной модели двухмассовой электромеханической системы

На начальном этапе для формирования критерия оптимальности проводилось регулярное сканирование области параметрической грубости системы с РНС ($\Omega_O \in [4,5; 12,5]$ рад/с, $\Omega_H \in [12,5; 125,0]$ рад/с) с шагом $\Delta\Omega_O = 0,25$ рад/с и $\Delta\Omega_H = 5,0$ рад/с соответственно. Нормированные коэффициенты характеристических полиномов системы варьировались в пределах $\pm 0,5$ от базовых значений, соответствующих распределению корней Ньютона: $d_1 = 4,0$; $d_2 = 6,0$; $d_3 = 4,0$. Полученные в результате зоны компромиссов Парето приведены на рис. 3, соответствующие уровни «хорошо-плохо» показателей качества САУ – в таблице.

На заключительном этапе была проведена оптимизация системы управления с РНС по комплексному критерию (3) с использованием поискового генетического алгоритма. Переходные характеристики исходного варианта САУ, полученного методом модального управления для распределения Ньютона, приведены на

рис. 4,а (для $\Omega_O = 5,5$ рад/с, $\Omega_H = 12,5$ рад/с, $\bar{q}_m = 0,45$) и на рис. 4,б (для $\Omega_O = 5,5$ рад/с, $\Omega_H = 75,0$ рад/с, $\bar{q}_m = 0,99$).

| Показатель | i | $q_i^{хор}$ | $q_i^{пл}$ |
|------------------------|-----|-------------|------------|
| t_H, c | 1 | 0,4 | 1,25 |
| $\bar{\sigma}_y, \%$ | 2 | 1,5 | 7,5 |
| $\bar{\sigma}_R, \%$ | 3 | 1,5 | 6,5 |
| $I_{Яmax}, A$ | 4 | 45 | 150 |
| $\bar{\sigma}_{nl}, A$ | 5 | 0,05 | 4,25 |

Соответствующие переходные характеристики системы с оптимальными параметрами $\Omega_O = 4,85$ рад/с, $\Omega_H = 30$ рад/с, $d_1 = 3,25$; $d_2 = 4,75$; $d_3 = 3,5$ при $\bar{q}_m = 0,33$ приведены на рис. 5,а,б. В обоих случаях кривые 1 соответствуют расчетным параметрам ЭМС, кривые 2 – увеличению коэффициента жесткости в 2,5 раза.

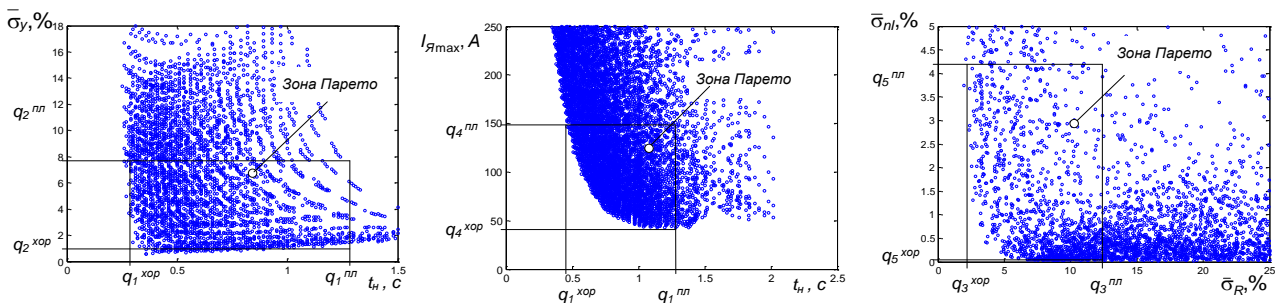


Рис. 3. Зоны компромиссов Парето для системы управления с РНС

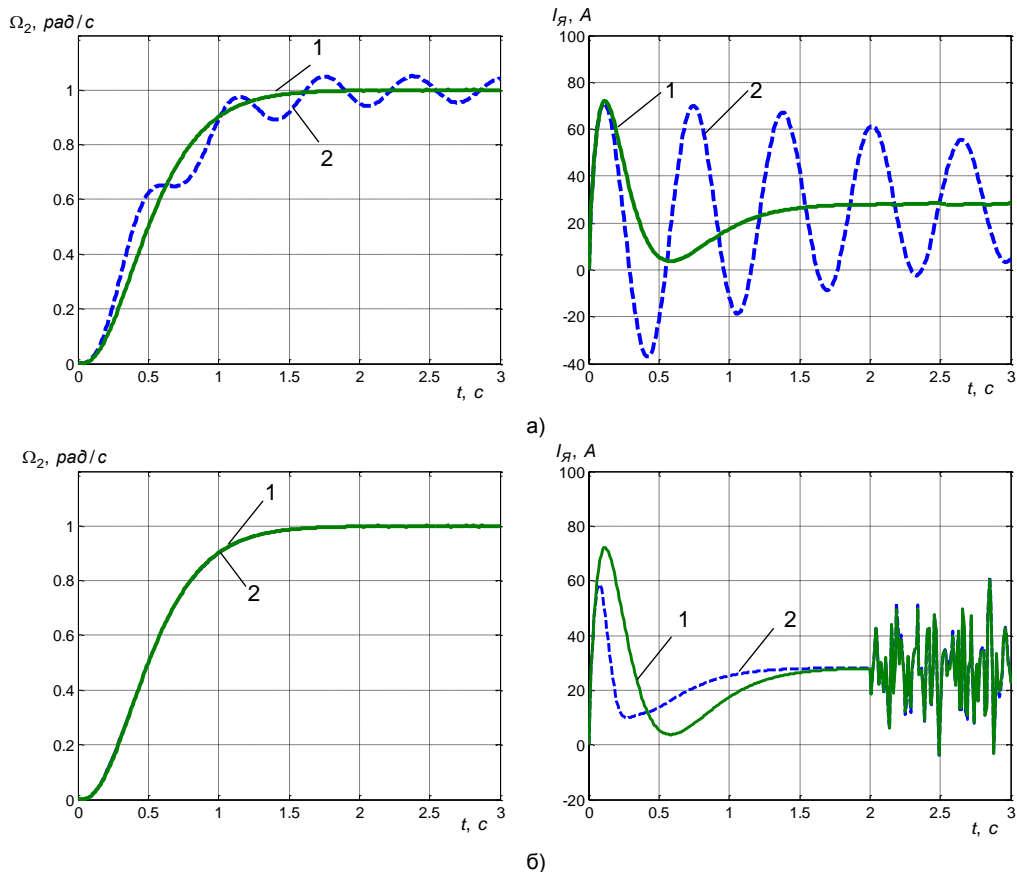


Рис. 4. Переходные характеристики вариантов систем управления двухмассовой ЭМС

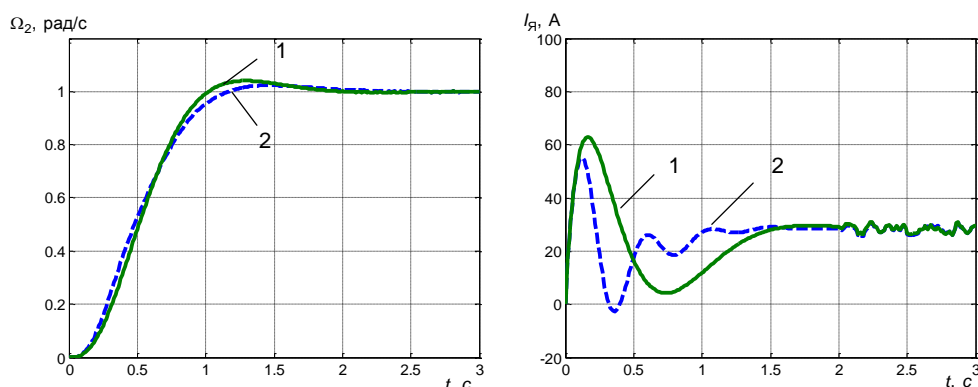


Рис. 5. Переходные характеристики оптимальной САУ двухмассовой ЭМС

По сравнению с исходными вариантами САУ, полученными методом модального управления, оптимальная система с РНС представляет собой компромиссное решение, обладающее достаточно низкой чувствительностью к воздействию помех при высокой робастности и заданных динамических характеристиках.

Список литературы

1. Анисимов А.А., Тарарыкин С.В. Особенности синтеза параметрически грубых систем модального управления с наблюдателями состояния // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2012. – № 5. – С. 3–14.
2. Анисимов А.А., Тарарыкин С.В. Формирование критерия оптимальности в задачах синтеза регуляторов состояния электромеханических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 10. – С. 36–42.
3. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
4. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления; пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
5. Ким Д.П. Синтез оптимальных по быстродействию непрерывных линейных регуляторов // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 2009. – № 3. – С. 5–14.
6. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления; пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 488 с.
7. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
8. Методы классической и современной теории автоматического управления: учеб. в 5 т. Т. 5: Методы современной теории автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: МГТУ, 2004. – 784 с.
9. Поляк Б.Т., Щербakov П.С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
10. Филимонов Н.Б. Проблема качества процессов управления: смена оптимизационной парадигмы // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 12. – С. 2–10.

Анисимов Анатолий Анатольевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, доцент кафедры электроники и микропроцессорных систем,
телефон (4932) 26-97-53,
e-mail: anis@eims.ispu.ru

Тарарыкин Сергей Вячеславович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электроники и микропроцессорных систем,
телефон (4932) 26-96-96,
e-mail: tsv@ispu.ru

References

1. Anisimov, A.A., Tararykin, S.V. Osobennosti sinteza parametricheski grubyykh sistem modal'nogo upravleniya s nablyudatelyami sostoyaniya [Peculiarities of synthesis of parametrically robust modal control systems with state observers]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2012, no. 5, pp. 3–14.
2. Anisimov, A.A., Tararykin, S.V. Formirovanie kriteriya optimal'nosti v zadachakh sinteza regulyatorov sostoyaniya elektromekhanicheskikh sistem [Optimization criterion formation in the problems of parametric synthesis of the state regulators in electromechanical systems]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2009, no. 10, pp. 36–41.
3. Basharin, A.V., Novikov, V.A., Sokolovskiy, G.G. *Upravlenie elektroprivodami* [Automatic control of electric drives]. Leningrad, Energoizdat, 1982. 392 p.
4. Dorf, R., Bishop, R. *Sovremennyye sistemy upravleniya* [Modern automatic control systems]. Moscow, Laboratoriya bazovykh znaniy, 2002. 832 p.
5. Kim, D.P. Sintez optimal'nykh po bystrodeystviyu nepreryvnykh lineynykh regulyatorov [Synthesis of continuous linear regulators with optimal speed]. *Izvestiya RAN. Avtomatika i telemekhanika*, 2009, no. 3, pp. 5–14.
6. Kuo, B. *Teoria i proektirovanie cifrovih sistem upravleniya* [Theory and design of digital control systems]. Moscow, Mashinostroenie, 1986. 488 p.
7. Kuzovkov, N.T. *Modal'noe upravlenie i nablyudayushchie ustroystva* [Modal automatic control and state observers]. Moscow, Mashinostroenie, 1976. 184 p.
8. Pupkov, K.A., Egupov, N.D. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya v 5 t., t. 5: Metody sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classic and modern theory of automatic control in 5 vol., vol. 5: Methods of modern theory of automatic control]. Moscow, MGTU, 2004. 784 p.
9. Polyak, B.T., Shcherbakov, P.S. *Robastnaya ustoychivost' i upravlenie* [Robust stability and control]. Moscow, Nauka, 2002. 303 p.
10. Filimonov, N.B. Problema kachestva protsessov upravleniya: smena optimizatsionnoy paradigmy [Problem of control process quality: changing of optimization paradigm]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2010, no. 12, pp. 2–10.

Аполонский Владимир Викторович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры электроники и микропроцессорных систем,
телефон (4932) 26-97-53,
e-mail: vlad-apolonskiy@yandex.ru